

초음파를 이용한 감자의 내부결함검사

김인훈*, 정규홍*, 장경영**, 서륜***, 김만수****

Ultrasonic Inspection of Internal Defects of Potatoes

In Hoon Kim*, Gyoo Hong Jung*, Kyung Young Jhang**, Ryun Seo*** and Man Soo Kim****

ABSTRACT

The nondestructive internal quality evaluation of agricultural products has been strongly required from the needs for individual inspection. Recently, the ultrasonic wave has been considered as a solution for this problem, and an ultrasonic system was constructed for the ultrasonic NDE of fruits and vegetables in our previous work. In this paper, the practical applicability of our ultrasonic system is tested for the inspection of internal defects (central cavity) in Atlantic potato. Sound speed and RMS of transmitted ultrasonic wave signal were measured and classification algorithm using 2 dimensional stochastic analysis. was presented. Experimental results showed greater value of sound speed and RMS (root mean square) of transmitted signal in normal samples than in abnormal samples with cavity. Also a stochastic method to distinguish normal and abnormal showed fault detection rate less than 5%.

Key Words : Agricultural products (농산물), Inspection of Internal Defect (내부결함검사), Ultrasound (초음파), Sound Velocity (음속), Root Mean Square (RMS)

1. 서론

농산물의 내부품질은 자연산에서는 물론 인공 환경 하에서의 생산에서도 개체별 차이가 크기 때문에 이를 평가하기 위해서는 전수검사가 필수적이고, 청과물의 경우 취급하는 개체수가 대량이므로 이를 신속하게 평가하기 위해서는 온라인 시스템이 필요하다.

이와 같은 요구를 만족시키기 위해서는 비파괴적인 검사방법이어야 할 것이며 지금까지 광학적 분광법¹, NMR기법² 등 여러 가지 방법들이 시도되어왔다. 그 중에서도 간편, 정확, 안전하게 평가할

수 있어야 하고 대상 청과물의 단가가 저가이므로 저렴한 비용으로 평가할 수 있어야 한다는 측면에서 초음파를 이용하는 기법이 유력한 수단의 하나로 기대 받게 되었다³. 그러나 지금까지의 초음파 기술은 대부분 의료진단이나 산업적 비파괴검사용으로 개발된 것인 반면 청과물에서의 초음파의 거동에 대하여는 거의 알려져 있지 않으며, 고유진동수가 비교적 저주파이고 대부분의 경우 청과물 내부에서의 감쇠가 매우 심하여 거의 투과되지 않는 것으로 알려져 있는 정도이다⁴.

또한 과일 농축액의 당도와 초음파 투과속도와 의 관련성⁵, 여러 가지 청과물에 대한 초음파 투과

2002년 8월 8일 접수
* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
** 한양대학교 기계공학부
*** 충남대학교 대학원 농업기계공학과
**** 충남대학교 농업기계공학과

속도⁶, 감쇠의 측정, 과실 경도 변화에 따른 초음파 감쇠 비교⁷ 등과 같은 단편적인 시도들이 있어 왔지만 내부 품질 평가에 직접적으로 응용한 사례는 지금까지 보고 된 바가 없다. 즉 초음파를 청과물 내부품질 평가에 적용하기 위한 연구가 매우 부족한 실정이고 세계적으로 이 부분에 대한 연구가 커다란 관심의 대상이 되고 있다⁸.

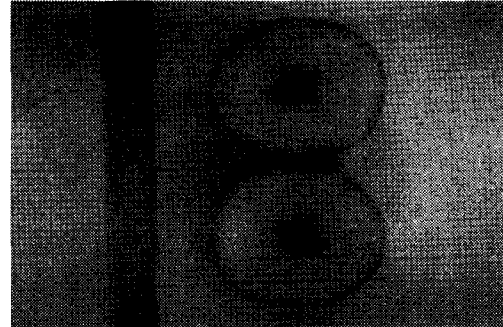
이에 따라 본 연구에서는 재배과정에서 내부 공동 결함이 많이 발생하는 대서 감자 품종을 대상으로 결함 검출을 위한 초음파 기술을 개발하고자 하였다. 이를 위해 먼저 감자에서의 일반적인 초음파 투과 특성과 인공 결함 시료에서의 특성을 비교 분석하고, 이를 기초로 음속과 투과신호의 RMS값을 측정 파라미터로 결정하였다. 그런데 이 둘 초음파 파라미터는 시료간 편차가 크기 때문에 어느 한 파라미터의 특정값을 기준으로하여 결함의 유무를 판정하기는 어렵다. 따라서 본 논문에서는 측정 파라미터로부터 감자의 내부 결함 유무를 판정하기 위한 통계적 접근 방법을 제안하였으며 다량의 시료에 대한 실험을 통하여 그 타당성을 검증하고자 하였다.

실험 장치에서는 선행 연구의 결과 개발된 초음파 송수신 시스템을 사용하였는데, 이 시스템에서는 50kHz의 비교적 저주파 초음파를 사용하였으며 신호의 투과성 향상 및 공중 누설과 역제를 위한 음향혼을 장착하여 사용하였다⁵.

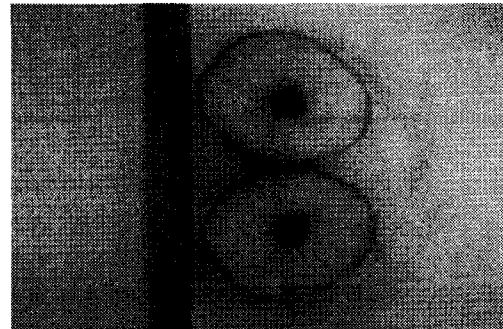
2. 재료 및 방법

2.1 실험재료

본 연구에 사용된 감자는 포테이토칩용으로 쓰이는 대서 품종의 감자^{10,11}로서 농심 대관령 연구소의 협조를 받아 입수하였다. 2000년 9월말경 수확되었으며 온도 5℃ 및 상대습도 76%에서 약 1달간 저온저장 되었다. 질량은 0.26~0.35kg, 체적은 $3.35\sim 5.52 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 의 분포를 보였다. 대서감자는 과경 비대기에 고온에 노출되면 과경 내부조직에 불균일한 영양 분배로 Fig. 1(a)와 같은 공동(空洞)이나 Fig. 1(b)와 같은 갈변현상이 나타나 품질을 떨어뜨린다. 특히 이 둘 증상은 대체로 수확량의 20% 가까이 발생하는 것으로 보고되고 있는데, 잘라보기 전에는 결함의 유무를 확인 할 수 없어 이를 가공 전에 선별하는 것은 품질 관리 측면에서 매우 중요하다^{10,11}.



(a)



(b)

Fig. 1 Potatoes with internal defects: (a) with cavity, and (b) browned

2.2 실험장치 및 방법

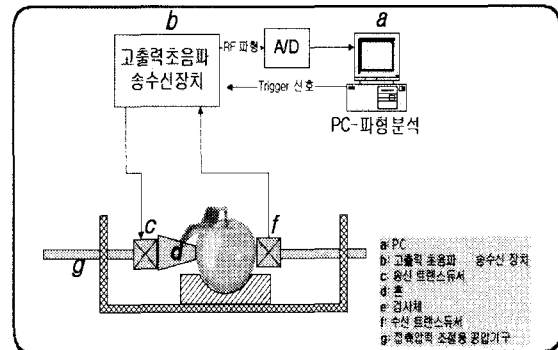


Fig. 2 Ultrasonic system for evaluating the internal quality of fruits and vegetables

Fig. 2는 선행 연구에서 고안 제작된 농산물용 초음파 측정시스템이다⁵. 그림에서 초음파 송수신

장치(RAM5000, Ritec)는 주파수 50kHz, 톤버스트 파형으로 송신트랜스듀서를 구동한다. 송신 트랜스듀서로부터 방사되는 초음파는 혼(horn)을 거쳐 시료에 입사되는데, 여기서 혼은 송신 트랜스듀서에서 수신 트랜스듀서로 공기중을 통해 유입되는 공중파를 방지하고, 검사체의 표면 형상에 자유롭게 대응할 수 있도록 하기 위함이다. 혼은 콘형으로 재질은 아크릴, 길이 100mm, 양단 면적비 5.0으로 테이퍼 가공되었다⁹. 시료를 투과한 초음파를 수신 트랜스듀서에서 수신하고 이를 A/D변환하여 PC에서 저장 및 분석한다. 또한 트랜스듀서와 시료 사이의 접촉력을 일정하게 하기 위하여 공압기구를 설치하였으며, 접촉압력은 3bar로 하였다. 초음파 파라미터와 내부결함과의 상관 관계 분석을 통한 내부 결함 판별을 위해 음속과 투과 초음파 신호의 세기를 측정하여 이용하였다. 여기서 음속은 시료의 두께를 송신파와 수신파의 시간차로 나누어 계산한다. 단, 송수신파의 시간차는 시간영역 신호에서 수신파가 처음 나타나는 시각을 기준으로 측정되며, 전자회로와 혼에서의 전파시간을 미리 측정하여 보정해 주었다. 한편 신호의 세기로는 수신파가 처음 도착한 시각 이후의 신호의 RMS(root mean square)값을 계산하여 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 감자의 내부결함과 초음파의 전파특성

대서 감자의 내부 중심 공동 유무 판별에 효과적인 초음파 파라미터를 찾아내기 위해 정상적인 샘플과 내부 결함이 있는 샘플에서의 초음파 투과 신호를 분석하였다. 이를 위해 내부 중심공동이 없는 11개의 시료에 대한 투과 신호를 얻고, 이들에 대해 지름 5mm의 인공 공동을 드릴링한 시료에서의 투과 신호를 얻어 비교하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 드릴링 전후의 투과 파형을 나타낸다. 투과시간과 투과진폭에 있어 확연한 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 초음파가 공동을 통과하면서 시간 지연과 투과 손실이 크게 나타나기 때문인 것으로 사료된다.

Table 1은 11개 시료에서 측정된 전파속도와 RMS의 평균값을 나타낸다. 측정된 평균 전파속도와 평균 RMS는 드릴링 전보다 드릴링 후의 샘플에서 현저히 낮게 나타났다. 따라서 전파속도와 RMS 값은 감자의 공동과 밀접한 관계가 있다고 예상할

수 있다. 이 외에도 주파수 성분 등의 변화를 관측하였으나 뚜렷한 변화는 나타나지 않았다.

Table 1 Velocity and Amplitude RMS for 11 potatoes sample

	Sample without hole	Sample with hole
Averaged transmitting velocity	479 m/s	372 m/s
Averaged RMS	0.76 dB	0.52 dB

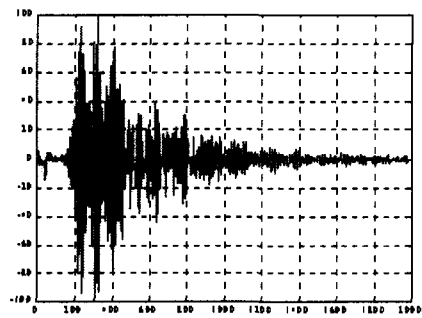


Fig. 3 Waveform before drilling

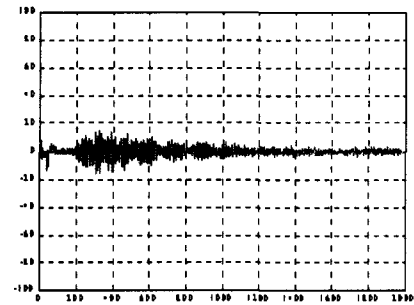


Fig. 4 Waveform after drilling

3.2 초음파 특성을 이용한 감자의 내부결함 검사 가능성 검증

앞의 인공결함 시료에 대한 검토에서 제시된 전파속도와 RMS를 이용하여 감자의 내부결함을 검사할 수 있는지에 대한 가능성을 검증하기 위하여 임의의 18개 시료에 대해 전파속도와 RMS를 측정하고 시료를 절단하여 내부 중심 공동 여부를 알아 보았다. 그 결과를 Table 2에 나타내었는데 인공 공동에서와 같이 결함시료에서의 전파속도와 RMS가 무결함 시료에서보다 작게 나타났다.

Table 2 Velocity and amplitude RMS for 18 potatoes sample

	Sample without defect	Sample with defect
Averaged transmitting velocity	453.0 m/s	384.0 m/s
Averaged RMS	0.71 dB	0.53 dB

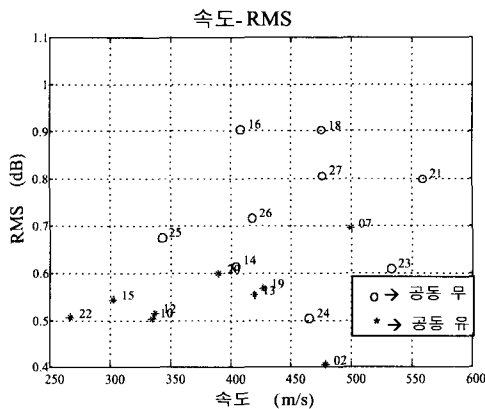


Fig. 5 Relationship between velocity and RMS for 18 potatoe samples

Fig. 5는 모든 시료에 대해 음속과 수신 신호의 RMS를 동시에 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 내부 중심 공동이 없는 시료(o표시)는 우 상단에 위치하고 있는데, 이는 전파속도가 크고, 수신 신호의 에너지도 크다는 것을 나타낸다. 이에 반해 결함을 가진 시료(x 표시)는 좌 하단에 분포하며, 이는 전파속도는 작고 수신신호의 에너지도 상대적으로 작게 나타났음을 의미한다. 이 결과로부터 초음파의 전파속도와 투과신호의 RMS값이 실제 감자의 내부 결함과도 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

그러나 결함시료집단과 정상시료집단 각각의 데이터가 특정 범위 내에 명확히 구분되어 나타나는 것은 아니며 흩어짐을 가지고 있기 때문에 실제 적용에 있어 감자 내부 중심 결함의 유무를 판정하기 위해서는 판정 기준이 필요한데, 이를 위해 본 연구에서는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 정상시료집단과 결함시료집단을 구분하는 대각선을 이용하기로 하였다. 대체로 정상집단은 그림의 우 상단에, 결함집단은 좌 하단에 분포하므로 이를 구분하는 적절한 대각선을 이용하면 검사체의 결함 여부를

용이하게 판정할 수 있을 것으로 기대되기 때문이다. 여기서는 이 대각선을 판별선이라 부르기로 하며 이의 결정 방법에 대해서는 다음 절에서 논하기로 한다.

3.3 2변량 정규분포분석에 의한 판별선의 결정

일반적으로 통계적 성질이 다른, 즉 평균과 표준편차가 서로 다른 두 집단의 확률밀도함수가 정규분포를 따른다면 이 두 집단은 확률밀도함수에 의해 구분될 수 있다. Fig. 6은 정상샘플집단과 결함샘플집단에서의 음속을 예로 들어 두 집단의 확률밀도함수를 비교하여 나타낸 것이다. 이것은 후술하는 실험에서 얻어진 결과를 이용한 것으로, 결함샘플집단의 음속이 평균적으로 정상샘플집단에서 보다 작고 흩어짐이 많은 것을 의미한다.

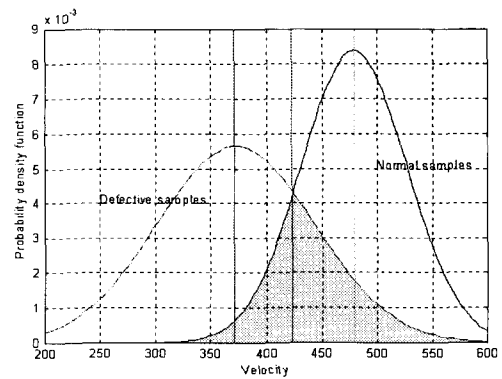


Fig. 6 Probability density function of velocities for normal and defect samples

이렇게 시료 집단의 확률밀도함수를 이용하면 그 시료가 어떤 집단에 속하는지를 구분할 수 있는데, 그 기준은 확률밀도함수의 교차점이 될 수 있다. 그러나 두 집단의 확률밀도함수가 중첩되는 영역이 넓으면 두 집단의 구분 능력은 떨어지게 되고, 두 집단의 평균값의 차이가 클수록 또 각 집단의 표준편차가 작을수록 두 집단을 구분하는 능력은 향상될 것이다. 이러한 능력은 두 확률밀도함수의 중첩영역에 해당하는 확률을 계산함으로써 평가할 수 있다.

그런데 본 연구에서는 측정 파라미터로 음속과 RMS를 이용하고 있으므로 이 둘 두 측정값을 동시

에 이용하게 되면 보다 구분 능력을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 음속과 RMS를 변수로 하는 2변량 정규분포분석을 이용한 구분을 시도하였다. 물론 RMS 측정값도 음속과 마찬가지로 그 확률밀도함수가 정규분포를 따른다고 가정한다.

한편 일반적으로 2변량 정규분포의 확률밀도함수는 식 (1)과 같이 표현된다¹².

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \times e^{-\frac{(\frac{x-x'}{\sigma_x})^2 + (\frac{y-y'}{\sigma_y})^2 - 2\rho(\frac{x-x'}{\sigma_x})(\frac{y-y'}{\sigma_y})}{2(1-\rho^2)}} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 상관계수로 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\rho = \frac{\sum_i (x_i - x')(y_i - y')}{\sqrt{\sum_i (x_i - x')^2 \sum_i (y_i - y')^2}} \quad (2)$$

이들 식 중의 x', y' 은 데이터 집단 $\{x_i\}$ 와 $\{y_i\}$ 의 평균값이다.

Fig. 7은 위의 두 변량 x 와 y 를 각각 측정 파라미터인 음속과 RMS값으로 생각하여 나타낸 확률밀도함수이다. 여기에 사용된 평균값과 표준편차는 후술하는 실험결과와 같다. 1차원 정규분포분석에서와 유사하게 두 집단이 잘 구분됨을 알 수 있다. 따라서 정상샘플집단과 결함샘플집단은 두 확률밀도함수의 교차점을 연결하는 직선을 경계로 구분할 수 있을 것이다. 이 때 정상샘플을 결함샘플로 판정하게 되거나 그 반대의 오류를 범할 확률은 두 확률밀도함수의 중첩영역의 확률을 계산함으로써 평가할 수 있다.

3.4 감자의 내부결함 판정 실험 결과

앞에서 검토한 초음파 파라미터와 판별선의 적용성을 검증하기 위해 Fig. 5에서 사용된 샘플에 30개를 추가하여 총 48개 시료에 대해 전파속도와 RMS를 측정하고 시료를 절단하여 결함 유무를 확인하였다. 그 결과를 Fig. 8에 나타낸다. Fig. 5에서와 유사하게 정상샘플의 측정결과는 우 상단에, 결함샘플의 측정결과는 좌 하단에 분포하는 것을 알

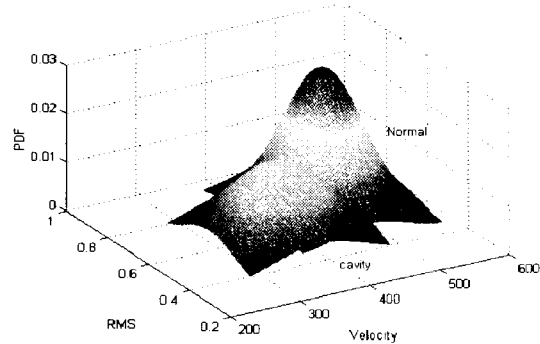


Fig. 7 Two-dimensional probability density function of velocity and RMS for normal and defect samples

수 있다. 또한 두 집단의 데이터는 평균값 부근에서 빈도수가 높고 가장자리로 갈수록 빈도수가 낮아지는 정규분포 형태를 보이고 있음을 알 수 있으며 이는 히스토그램을 통해서도 확인할 수 있었고, 따라서 이들 집단의 데이터에 대한 2변량 정규분포 분석기법의 적용이 가능하다.

판별선을 구하기 위해 각각 샘플 집단의 데이터에 대한 평균값과 표준편차를 구한 결과를 Table 3에 나타낸다. 그리고 2차원 정규분포함수의 $\pm 2\sigma$ 범위, 즉 데이터의 95.5%가 포함되는 범위를 그림에 표시하였다. 정상집단은 거의 원형에 가깝게 보이는 반면 결함집단은 타원형의 형태를 띠고 있다. 또한 이들 정규분포함수의 교점으로부터 앞에서 제

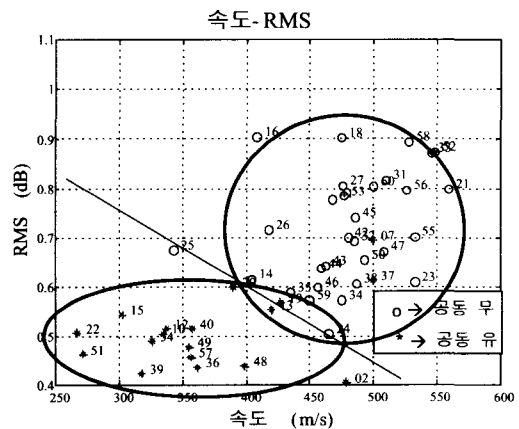


Fig. 8 Relationship between velocity and RMS for 48 potato samples

Table 3 Average and Standard deviation of velocity and RMS values for potato samples

	Sample without defect	Sample with defect
Average Transmitting Velocity	477 m/s	360 m/s
Average RMS	0.70 dB	0.49 dB
Standard Deviation of Transmitting Velocity	47.6 m/s	55.7 m/s
Standard Deviation of RMS	0.117 dB	0.063 dB

안한 판별선을 구하여 그림에 나타내었다. 정상 샘플집단과 결함샘플집단을 매우 잘 구분하고 있음을 확인할 수 있다. Table 4는 판정결과를 보여주는 것으로 오판정은 2개 시료(시료번호 19와 25)에 불과하다.

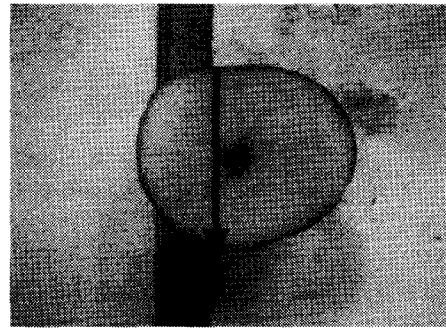
한편, 시료 07과 37은 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 감자의 형상이 매우 불균일하여 초음파 전파경로가 중심을 벗어난 경우로, 결함을 가지고 있지만 초음파는 이 결함부위를 통과하지 않았기 때문에 정상샘플과 유사한 결과를 나타낸 것으로 판명되었다. 따라서 이 데이터는 분석대상에서 제외되었다. 아울러 제안하는 기법의 실제 적용시 초음파의 전파경로가 시료의 중앙부를 통과하도록 주의할 필요가 있을 것으로 사료된다.

Table 4 Accuracy of classification for 46 samples

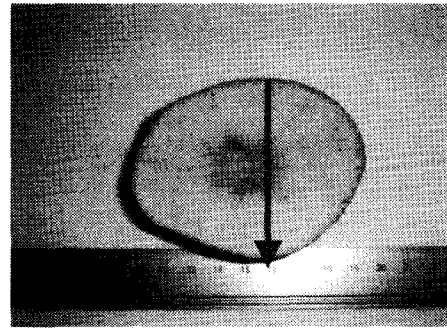
Correct	44	95.7%
Wrong	2	4.3%
Total	46	100%

또 오판정된 2개 시료는 판별선 부근에 위치하여 시료 13, 14, 20, 24와 함께 그 판정이 애매할 수 있는데, 이 들 시료는 실제로는 매우 미약한 결변 상태로 결함으로 간주할 수도 아닐 수도 있는 시료이었다. 따라서 실제 적용에 있어서는 판별선을 다소 이상단으로 상향 조정하여 이용하는 것이 필요

할 것으로 사료된다. 이는 정상샘플을 결함샘플로 판정하는 것보다 결함 샘플을 정상샘플로 판정하는 것을 꼭 피하고자 하는 경우가 일반적이기 때문이다.



대서 #07



대서 #37

Fig. 9 Potato samples that were classified as normal but they had internal defect

그리고 앞서 기술한 바와 같이 정상샘플을 결함 샘플로 판정하게 되거나 그 반대의 오류를 범할 확률은 두 확률밀도함수의 중첩영역의 확률을 계산함으로써 평가할 수 있는데, 본 실험결과에서는 전자의 경우 4.5%, 후자의 경우가 2.9%로 추정되었다. 앞에서 판정선을 이상단으로 이동시키는 것은 후자의 확률, 즉 결함샘플을 정상샘플로 판정하는 오류를 0%에 가깝게 하기 위한 것으로 생각할 수 있다.

4. 결론

청과물의 내부 품질을 초음파를 이용하여 비파괴적으로 평가하기 위한 시스템을 구성하였으며 감자(대서)에 적용하여 시험한 결과는 다음과 같다.

1) 초음파를 이용한 청과물 품질 평가 시스템의 가능성을 제시하였다. 여기서는 투과성을 최대화하기 위해 50kHz의 비교적 낮은 주파수 대역을 사용하고 안정적인 접촉을 위한 공압기구를 적용하였으며, 또한 혼을 장착하였다.

2) 본 시스템의 가능성을 포테이토허용 대서 감자를 예로 들어 검증하였다. 여기서는 음속 및 수신 신호의 RMS레벨을 파라미터로 하여 내부 공동 유무를 판정하였으며, 음속과 RMS를 변량으로 하는 2변량 정규분포분석에 기초하여 음속-RMS 분포도에 판별선을 생성하여 판정에 이용하였다.

3) 46개 샘플에 대해 음속 및 RMS를 측정하고 결과 결합샘플에서 정상샘플보다 작은 음속과 RMS가 얻어 졌으며, 음속-RMS 분포도에서는 결합샘플은 좌하단에, 정상샘플은 우상단에 분포하는 형태를 나타냈다.

4) 제안한 판별선을 이용하여 샘플의 결합 유무를 판정한 결과 초음파 전파경로가 감자의 중심을 벗어나 오판정된 경우를 제외하면 정판정률은 95.7%(46개 중 2개)이었다. 다만 실제 적용에서 판정선 부근의 데이터는 판정에 오류를 야기할 가능성이 있는데, 특히 결합시료를 정상으로 판정하는 오류를 억제하고자 하는 경우에는 본 연구에서 제시된 판정선을 우상단으로 이동하여 활용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

5) 본 연구에서는 수확시기 및 재배지가 한정된 시료만을 대상으로 하였기에 제시된 판정선이 모든 대서 감자의 경우에 적용될 수 있다는 것은 아니며, 제안하는 방법의 보다 객관적인 검증을 위하여는 향후 수확시기 및 재배지의 차이에 따른 많은 시료에 대한 분석이 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2001년도 한양대학교 교비연구비 지원 및 2001년도 농림기술개발사업의 일부 지원으로 연구되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Kawano, S., Watanabe, H. and Iwamoto, M., "Determination of Sugar Contents in Intact Peach by Near Infra-red (NIR) Spectroscopy," 日本園藝學會誌 Vol. 58, No. 2. pp. 604-605, 1989.
2. Tsuruoka, H. and Takatsuji, M., "Application of Impedance Tomography to the Measurement of Quality of Fruit," 計測自動制御學會論文集, Vol. 22, No. 9, pp. 994-999, 1987.
3. Chen, P., McCarthy, M. J. and Kauten, R., "NMR for Internal Quality Evaluation of Fruits and Vegetables," ASAE, Vol. 32, No. 5, pp. 1747-1753, 1989.
4. Park, B., "Ultrasonic Technology for Nondestructive Food Quality Evaluation," Proc. Int. Symp. on Quality Evaluation of Agricultural Products and Foods Using Nondestructive Techniques, Seoul, Korea, pp. 112-134, Nov. 16, 1996.
5. 장경영, 김만수, 조한근, "수박에서의 초음파 전파특성에 관한 실험적 연구," 한국농업기계학회지, Vol. 23, No. 6, pp. 615-620, 1998.
6. Mizrach, A., Galili, N. and Rosenhouse, G., "Determination of Fruit and Vegetable properties by Ultrasonic Excitation," ASAE, Vol. 32, No. 6, pp. 2053-2058, 1989.
7. Contreras, N. I., Fairley, P., McClements, J. D. and Malcolm Povey J. W., "Analysis of the sugar content of fruit juices and drinks using ultrasonic velocity measurements," International Journal of Food Science and Technology, Vol. 27, pp. 515-529, 1992.
8. Mizrach, A., Flitsanov, U. and Fuchs, Y., "An Ultrasonic Nondestructive Method for Measuring Maturity of Mango Fruit," ASAE, Vol. 40, No. 4, pp. 1107-1111, 1997.
9. 實吉純一 외2인 감수, 超音波便覽, 日刊工業新聞社, pp. 1642-1650, 1978.
10. 김현준 외8인, "재배조건에 따른 가공용 감자의 품질에 관한 연구," 농사시험연구논문집, Vol. 33, No. 2, pp. 83-90, 1991.
11. 김현준, 김승열, 신관용, 김학기, "재배조건에 따른 가공용 감자의 품질에 관한 연구," 원예작물연구논문집, Vol. 39, No. 1, pp. 150-157, 1997.
12. A. Hald, Statistical Theory with Engineering Applications, John Wiley & Sons, pp. 585-623, 1967.